نمک‌زدایی و تصفیه آب با فناوری فیلتر ممبران غشایی

فاطمه بکائی
شرکت مدیریت تولید برق منتظر قائم

شرکت مدیریت تولید برق منتظر قائم
(سهامی خاص)

◄ کلمات کلیدی

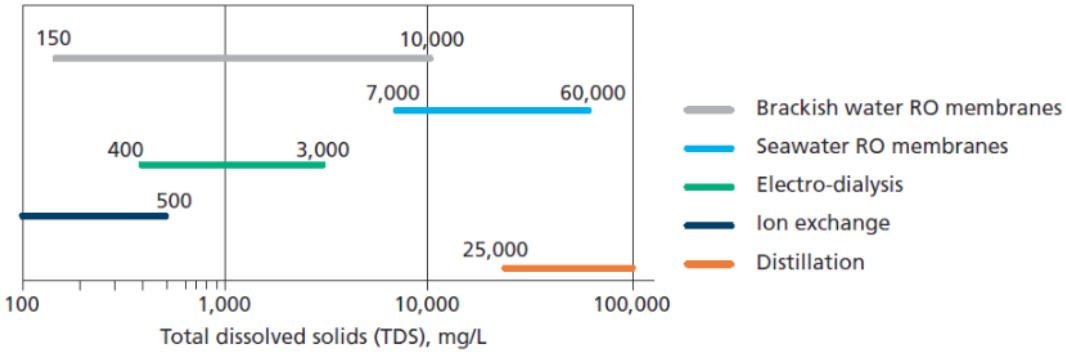
نمک زدایی آب، فیلتراسیون، ممبران غشایی، اسمز معکوس

◄ مقدمه

در طی چند دهه گذشته فناوری های نمک‌زدایی آب دریا و آب‌های شور با شیب بسیار تندی گسترش یافته است. راهکارهای متنوعی از جمله صرفه‌جویی، انتقال آب، بازیافت و تصفیه آب برای کنترل و رفع کمبود آب در دنیا مطرح شده است. در این راستا تصفیه آب با فرایندهای غشایی به عنوان یکی از بهترین روش‌های شیرین‌سازی آب شور، دریا و فاضلاب به منظور استحصال آب شرب، صنعتی و کشاورزی شناخته شده و دامنه کاربرد این سیستم‌ها به طور مداوم در حال گسترش است. افزایش تقاضا در صنعت برای صرفه‌جویی در مصرف آب، کاهش مصرف انرژی، کنترل آلودگی و بازیابی پساب‌ها، افزایش کاربرد سیستم‌های تصفیه آب را در پی داشته است. علاوه بر این، پیشرفت در زمینه‌های بیوتکنولوژی و داروسازی، همراه با پیشرفت در توسعه غشا، غشاها را به یک تجهیز جداسازی مهم تبدیل می‌کند که در مقایسه با تقطیر، صرفه‌جویی در انرژی را در بر دارد. در این مقاله به معرفی انواع غشاهای تصفیه آب، کاربرد و نحوه کار آن‌ها پرداخته می‌شود.

◄ فناوری‌های نمک‌زدایی و فرآیندهای فیلتراسیون

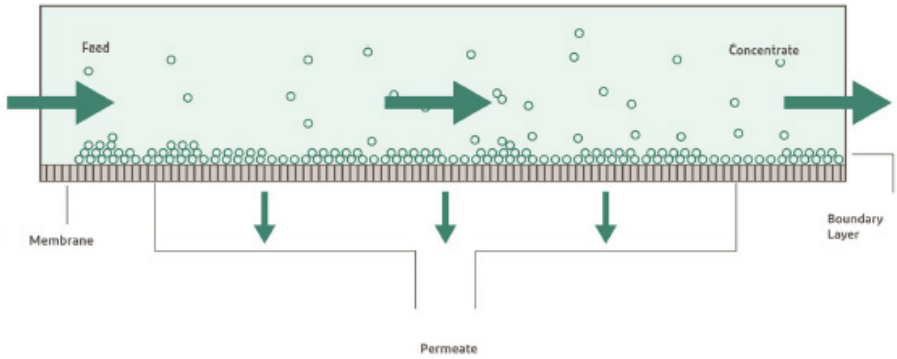
فرایندهای نمک‌زدایی متداول به دو دسته حرارتی و غشایی قابل تقسیم هستند. غشا لایه نازکی است که عملیات جداسازی را انجام می‌دهد و معمولا از مواد مختلفی مانند پلیمر یا سلولز ساخته می‌شود. غشا تصفیه آب به عنوان مانعی عمل می‌کند که به طور انتخابی تنها مولکول‌های آب را عبور می‌دهد و سایر مواد موجود در آب بر اساس اندازه و یا ویژگی‌های آن‌ها در پشت غشا باقی می‌مانند. غشاها در مقیاس کوچک یا مقیاس بسیار بزرگ می‌توانند منابع طبیعی آب‌های شور و دریا را تصفیه کنند. آب‌های تصفیه شده، اکثر استانداردهای قابل اجرا برای کیفیت آب آشامیدنی را برآورده می‌کنند. R.O و N.F می‌توانند هزینه‌های احیا و پساب را در صورت استفاده مستقل، در ترکیب یا با سایر فرآیندها مانند تبادل یونی کاهش دهند و آب با کیفیت بسیار بالایی تولید کنند یا زمانی که با فرآیندهای تقطیر حرارتی همراه شوند، می‌توانند استفاده از انرژی برق را بهبود بخشند. شکل 1 نمای کلی از فرآیندهای اصلی نمک‌زدایی در محدوده‌های مختلف شوری آب را نشان می‌دهد.



شکل 1 : فرآیندهای اصلی نمک زدایی آب با شوری مختلف

◄ نحوه کار فیلتر غشایی

برای حذف ذرات ریز و نمک‌های محلول از فیلتراسیون غشایی استفاده می‌شود. در این روش مطابق شکل 2 از یک جریان ورودی تحت فشار استفاده می‌شود که به موازات سطح غشاء جریان دارد. بخشی از این جریان از غشاء عبور می‌کند و ذرات را در جریان آب غلیظ (کانسنتریت) باقی می‌گذارد. از آنجایی که یک جریان مداوم در سطح غشاء وجود دارد، ذرات رد شده تجمع نمی‌یابند، بلکه به وسیله جریان آب غلیظ[1] دورریز می‌شوند. بنابراین، یک جریان ورودی به دو جریان خروجی شامل آب تصفیه شده و آب ریجکتی (کانسنتریت) تقسیم می‌شود:



شکل 2 : جریان عبوری از غشا

[1]Concentrate Stream

گروه خبری نتسا را به نشانی NetsaNews در صفحات مجازی دنبال کنید.

◄ انواع فناوری های مختلف غشایی و فیلتراسیون

فیلترهای غشایی انواع مختلفی دارند که هر کدام برای نیازهای فیلتراسیون خاصی طراحی شده‌اند. فناوری‌های مختلف فیلتراسیون که در حال حاضر وجود دارد را می‌توان بر اساس اندازه ذرات حذف شده، شکل و نوع غشا، ماده سازنده و فشار عملیاتی به شرح زیر طبقه‌بندی کرد.

میکروفیلتراسیون (MF[2])

میکروفیلتراسیون ذرات در محدوده تقریبا 1 – 0/1 میکرون را حذف می‌کند. به طور کلی، ذرات معلق و کلوئیدهای بزرگ به وسیله فیلتر گرفته می‌شوند در حالی که ماکرومولکول‌ها و جامدات محلول از غشای MF عبور می‌کنند. کاربردهای این مدل فیلتر شامل حذف باکتری‌ها، مواد لخته شده یا TSS (کل مواد جامد معلق) است. فشارکاری فیلتراسیون تقریبا 10 psi است.

اولترافیلتراسیون (UF[3])

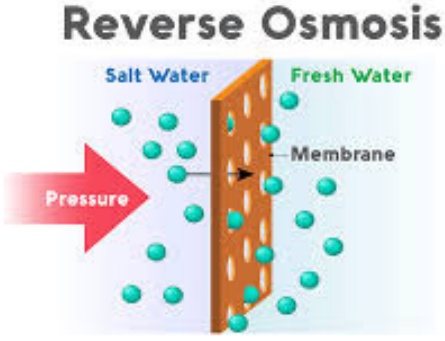
اولترافیلتراسیون، جداسازی ماکرومولکولی برای ذرات در محدوده 1000 - 20 آنگستروم (یا 0/1 میکرون) را انجام می‌دهد. تمام نمک‌های محلول و مولکول‌های کوچک‌تر از غشاء عبور می‌کنند. کلوئیدها، پروتئین‌ها، آلاینده‌های میکروبیولوژیکی و مولکول‌های آلی بزرگ به وسیله غشاء گرفته می‌شوند. فشارکاری فیلتراسیون تقریبا 100- 15 psi است.

نانو فیلتراسیون (NF[4])

نانوفیلتراسیون برای دفع ذرات در محدوده اندازه تقریبی 1 نانومتر (10 آنگستروم) کاربرد دارد و در ناحیه بین UF و اسمز معکوس کار می‌کند. مولکول‌های آلی با وزن مولکولی بیشتر از 400 – 200 و همچنین نمک‌های محلول در محدوده % 98 - 20 درصد دفع می‌شوند. دفع نمک‌هایی دارای آنیون‌های تک ظرفیتی (مانند کلرید سدیم یا کلریدکلسیم) 20-80%، درحالی‌که دفع نمک‌های آنیون‌های دو ظرفیتی (مانند سولفات منیزیم) 90 -98% است. کاربردهای معمولی نانوفیلتراسیون، شامل حذف رنگ و کل کربن آلی[5](TOC) از آب‌های سطحی، حذف سختی یا رادیوم از آب چاه و شور، کاهش کلی جامدات محلول [6](TDS) جداسازی مواد آلی از مواد معدنی در صنایع مواد غذایی و فاضلاب است. فشارعبوری از غشا معمولا 225- 50 psi است.

اسمز معکوس (R.O)

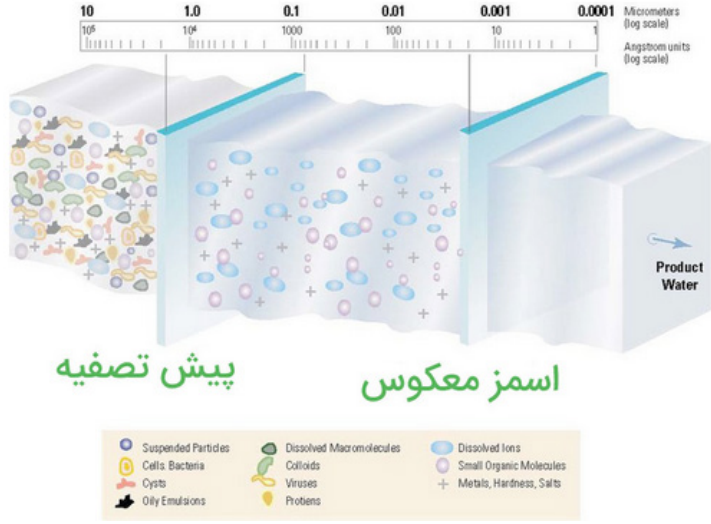
اسمز معکوس بهترین نوع فیلتراسیون موجود است.اسمز معکوس (RO) فرآیندی است که در آن آب حاوی نمک‌های معدنی (مواد معدنی)، جامدات معلق، مواد آلی محلول و نامحلول، میکروارگانیسم‌های آبی و گازهای محلول (که در مجموع اجزاء یا آلاینده‌های آب نامیده می‌شوند) تحت فشار از طریق یک غشای نیمه‌تراوا منتقل می‌شود. نیمه تراوا به غشایی گفته می‌شود که به طور انتخابی به آب اجازه می‌دهد تا با سرعت بسیار بالاتری نسبت به سرعت انتقال اجزای موجود در آب از آن عبور کند.



شکل 3 : غشای اسمز معکوس

[2] Microfiltration
[3] Ultrafiltration
[4] Nanofiltration
[5] Total organic carbon
[6] Total Dissolved Solids

بسته به اندازه و بار الکتریکی یون‌ها، اکثر اجزای آب در سمت تغذیه غشاء RO در حالی که آب تصفیه شده (پرمییت) از غشاء عبور می‌کند، در پشت غشا باقی می‌مانند. شکل 5 اندازه و انواع جامدات حذف شده به وسیله غشاهای RO را در مقایسه با سایر فناوری‌های رایج فیلتراسیون نشان می‌دهد.



شکل 4 : اندازه و انواع ذارت حذف شده به وسلیه غشا

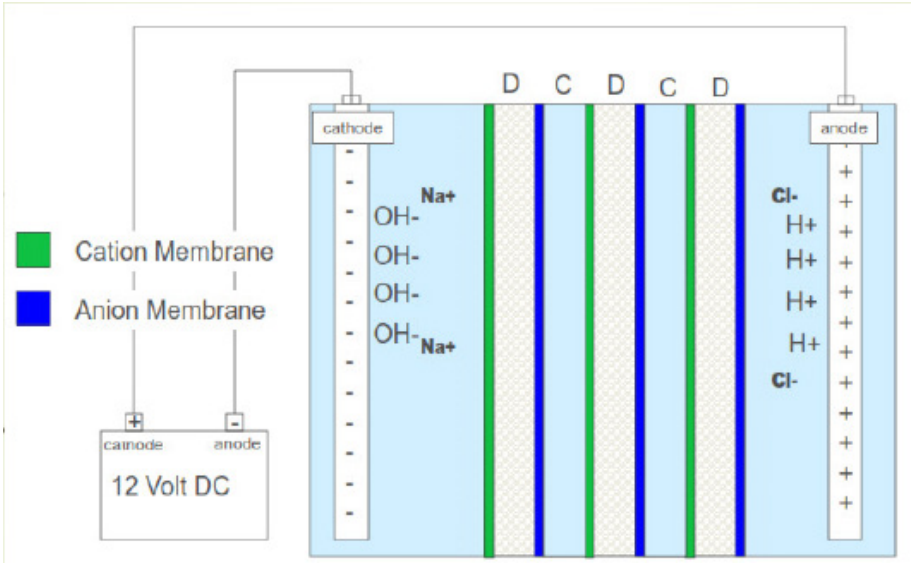
غشاهای RO می‌توانند ذرات و جامدات محلول را با هر اندازه‌ای دفع کنند. با این حال، گازهای محلول در آب را به دلیل اندازه مولکولی کوچک خود دفع نمی‌کنند. از نظر اندازه فیزیکی، غشاهای RO می‌توانند مواد جامد بزرگ‌تر از 1^{7} Å را دفع کنند. ساختار و پیکربندی غشاهای RO به گونه‌ای است که نمی‌توانند مقادیر زیادی از جامدات معلق را ذخیره و در سطح خود حذف کنند. اگر ذرات جامد در آب ورودی باقی بمانند، انباشته می‌شوند و به سرعت سطح غشاهای RO را مسدود می‌کنند و به غشاها اجازه نمی‌دهند که فرآیند نمک‌زدایی مداوم را در حالت ثابت حفظ نماید. بنابراین، جامدات معلق (ذرات) موجود در آب مورد استفاده برای نمک‌زدایی باید قبل از رسیدن به غشاهای RO حذف شوند.

الکترودیالیز

یکی دیگر از روش‌های کاربردی تصفیه آب که براساس استفاده از غشاها و با اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی بنا شده است روش الکترودیالیز است. غشاهای مورد استفاده برای ED ساختار متخلخلی شبیه به غشاهای میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون دارند و در برابر کلر و رسوب مقاوم‌تر و به طور قابل توجهی ضخیم‌تر از غشاهای RO هستند در مقایسه با غشاهای مخصوص آب شور RO ، که معمولا تنها تا 75 درصد بازیافت دارند، سیستم‌های ED می‌توانند به بازیابی آب شیرین 95 درصد یا بیشتر برسند از آنجایی که یون‌ها روی سطح الکترودها تجمع می‌کنند، به مرور زمان باعث ایجاد رسوب می‌شوند و باید مرتبا تمیز شوند تا فرآیند الکترودیالیز در حالت ثابت حفظ شود. یک راه حل عملی برای این چالش، معکوس کردن قطبیت الکترودهای دارای بار مخالف به صورت دوره‌ای (معمولا دو تا چهار بار در ساعت) است تا از تمیز کردن مکرر الکترود جلوگیری شود و این فرایند EDR نامیده می‌شود.

[7] Angstrom

گروه خبری نتسا را به نشانی NetsaNews در صفحات مجازی دنبال کنید.



شکل 5 : نحوه کار الکترودیالیز

انرژی مورد نیاز برای نمک‌زدایی ED متناسب با میزان TDS آب ورودی است. به طور معمول، ED برای آب‌های با TDS کمتر از 3000 میلی‌گرم در لیتر مقرون به صرفه است. با این حال، این محدوده کاربردی تابعی از هزینه برق و ممکن است از پروژه‌ای به پروژه دیگر متفاوت باشد. راندمان حذف TDS سیستم‌های ED تحت تاثیر ترکیبات غیریونیزه یا با بار یونی ضعیف (به عنوان مثال، ذرات جامد، مواد آلی و میکروارگانیسم‌ها) قرار نمی‌گیرد. بنابراین، فرآیندهای نمک‌زدایی غشایی ED می‌توانند آب‌های با کدورت بالاتر و پتانسیل بایوفولینگ را نسبت به سایر سیستم‌هایی غشایی مانند RO تصفیه کنند، اما راندمان حذف TDS سیستم‌های ED معمولا کمتر از سیستم‌های RO است (15 تا 90 درصد در مقابل 99 درصد)، و به همین دلیل عمدتا برای نمک‌زدایی آب شور کاربرد عملی پیدا نکرده‌اند. به طور کلی، سیستم‌های ED تنها می‌توانند به طور موثر ذرات دارای بار الکتریکی قوی مانند یون‌های نمک تک و دو ظرفیتی، سیلیس، نیترات‌ها و رادیوم را حذف کنند و با توجه به ترکیبات و ذرات کم بار، یعنی آلی و پاتوژن، راندمان حذف بسیار پایینی دارند. جدول 2 مقایسه‌ای از راندمان سیستم‌های تقطیر، ED و RO برای حذف ترکیبات آب ارائه می‌دهد. یکی از مشاهدات مهم از این جدول این است که در مقایسه با تقطیر و RO، نمک‌زدایی ED فقط تا حدی املاح را از آب حذف می‌کند.

جدول 1 : حذف آلاینده‌ها با فناوری‌های نمک‌زدایی

Contaminant	Distillation (%)	ED/EDR (%)	RO (%)
TDS	>99.9	50–90	90–99.5
Pesticides, Organics/VOCs	50–90	<5	5–50
Pathogens	>99	<5	>99.99
TOC	>95	<20	95–98
Radiological	>99	50–90	90–99
Nitrate	>99	60–69	90–94
Calcium	>99	45–50	95–97
Magnesium	>99	55–62	95–97
Bicarbonate	>99	45–47	95–97
Potassium	>99	55–58	90–92

هزینه‌های ساخت و تجهیزات برای سیستم‌های اسمز معکوس آب شور (BWRO) و ED با ظرفیت تولید آب شیرین یکسان معمولا قابل مقایسه است و یا بسته به پتانسیل رسوب‌گذاری آب در سیستم R.O، سیستمED هزینه کمتری دارد سیستم‌های ED به اندازه سیستم‌های RO برای نمک‌زدایی BWRO استفاده نمی‌شوند و برای نمک‌زدایی اسمز معکوس آب دریا (SWRO) کاربردی ندارند .البته لازم به ذکر است کهTDS تنها معیار برای ارزیابی رقابت‌پذیری هزینه سیستم‌های ED و BWRO نیست. اغلب ترکیبات دیگری مانند سیلیس نقش کلیدی در فرآیند تصمیم‌گیری دارند. به طوری که تجربه شده برای سیستم‌های بزرگ در حد ظرفیت 200000 مترمکعب در روز و با منبع آب ورودی رودخانه و آب سطحی و میزان بالای از سیلیس، سیستم ED می‌تواند 90 درصد بازیابی را به دست آورد در حالی که با شرایط مشابه راندمانBWRO تنها به 65 درصد محدود می‌شود و با توجه به اینکه آب رودخانه دارای محتوای آلی بسیار بالایی است باعث رسوب‌گیری و محدودیت‌های عملیاتی سنگین در سیستم BWRO با اندازه مشابه می‌شود.

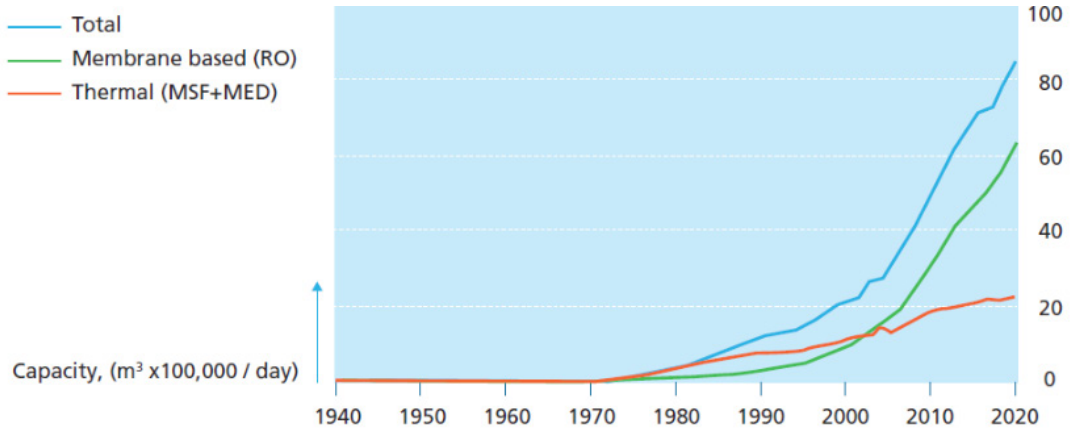
◄ جمع‌بندی:

فیلترهای غشایی انواع مختلفی دارند که هر کدام برای نیازهای فیلتراسیون خاصی طراحی شده اند در جدول زیر تفاوت‌های اصلی بین چهار نوع ممبران تصفیه آب صنعتی ارائه شده است:

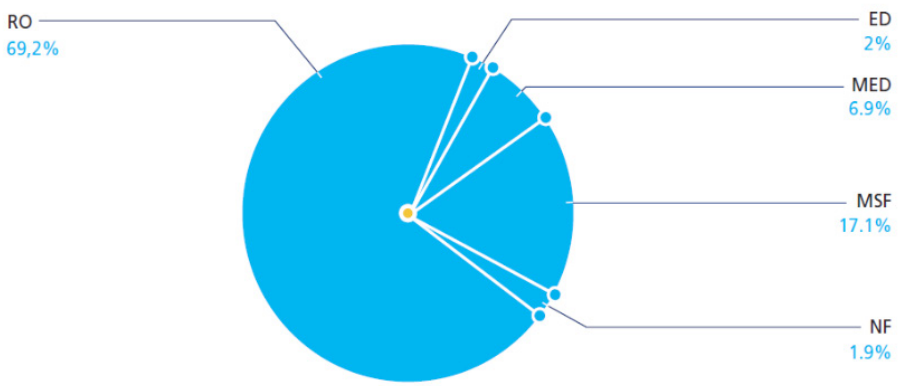
نوع ممبران	اندازه حفره‌ها	فشار عملیاتی	نرخ حذف نمک (٪)	کاربردها	نوع آلاینده‌های حذف شده
اسمز معکوس (RO)	۰.۰۰۰۱ میکرون	۱۵ تا ۷۰ بار	۹۵ تا ۹۹.۷	تصفیه آب دریا، آب شور، تصفیه آب صنعتی	ترکیبات محلول در آب و کاهش پارامتر TDS
نانوفیلتراسیون (NF)	۰.۰۰۱ میکرون	۵ تا ۲۰ بار	۵۰ تا ۹۰	کاهش سختی آب، حذف آلاینده‌های آلی، تصفیه آب‌های سطحی	حذف مواد آلی، کلسیم، منیزیم، و برخی نمک‌ها
اولترافیلتراسیون (UF)	۰.۰۱ تا ۰.۱ میکرون	۱ تا ۷ بار	–	پیش تصفیه قبل از RO، تصفیه آب‌های سطحی	حذف ویروس‌ها، باکتری‌ها، مواد آلی و ذرات معلق
میکروفیلتراسیون (MF)	۰.۱ تا ۱ میکرون	۰.۵ تا ۲ بار	–	پیش تصفیه قبل از UF و RO، تصفیه نهایی	حذف ذرات معلق، باکتری‌ها، کدورت

گروه خبری نتصا را به نشانی NetsaNews در صفحات مجازی دنبال کنید.

نمودار زیر آمار تولید آب شیرین از منابع آب دریا، شور و فاضلاب را نشان می دهد همانطور که در نمودار مشخص است حدود دو سوم این مقدار با کمک فرایندهای صورت گرفته و مابقی با استفاده ار فرایندهای حرارتی بوده است و دلیل آن نیز پایین بودن هزینه سرمایه‌گذاری اولیه فرایند اسمز معکوس و مصرف انرژی پایین‌تر نسبت به فرایندهای غشایی است.



شکل 6 : آمار جهانی تولید آب شیرین و روند رشد آن (منابع آب دریا، آب‌های لب شور و فاضلاب‌های تصفیه شده)



شکل 7 : سهم فرایندهای مختلف در نمک‌زدایی

اسمز معکوس (RO) دقیق‌ترین روش تصفیه آب است و برای حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها از جمله نمک‌ها و مواد معدنی استفاده می‌شود و به طور گسترده‌ای به عنوان موثرترین و اقتصادی‌ترین گزینه‌های فرآیند تصفیه شناخته شده‌است. در طول 20 سال گذشته، RO به دلیل مصرف رقابتی انرژی و هزینه‌های تولید آب نسبت به سایر فناوری‌های نمک‌زدایی سریع‌تر تکامل یافته است مقالات بعدی منحصرا بر برنامه‌ریزی و مهندسی سیستم‌های نمک‌زدایی غشایی RO تمرکز دارد.

◄ منابع:

[1] FilmTec, Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, Version 16 February 2023.
[2] Reverse Osmosis and Nanofiltration, Second EDtion, AWWA MANUAL M46
[3] Global Water Intelligence and International Desalination Association, IDA Desalination Yearbook 2011–2012, International Desalination Association and Global Water ntelligence, Oxford, UK.